E/CONF.39/D/123
24 Oct.1962
ORIGINAL : RUSSIAN

КОНФЕРЕНЦИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ
ПО ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ НАУЧНЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ ЗНАНИЙ
ДЛЯ УДОВЛЕТВОРЕНИЯ ПОТРЕБНОСТЕЙ МЕНЕЕ РАЗВИТЫХ РАЙОНОВ

ПУНКТ ПОВЕСТКИ ДНЯ: D.4.2

БЕЛОРУССКАЯ ССР

МЕТОДЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ СУШКИ ХИМИЧЕСКИХ, ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ И СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Составил А. В. ЛЫКОВ

Документы, составленные для Конференции Организации Объединенных Наций по вопросу о применении научных и технических знаний для удовлетворения потребностей менее развитых районов, служат в качестве рабочих документов для этой Конференции. Они опубликованы в том виде, в каком были представлены их составителями, и их содержимое и выраженные в них мнения принадлежат их составителям (см. примечания на оборотной стороне).

ПРИМЕЧАНИЯ

1. Документы, включенные в число материалов, принятых для обсуждения на общих сессиях, будут в распоряжении делегатов Конференции на следующих официальных языках Организации Объединенных Наций: русском, английском, испанском и французском.

2. Документы, включенные в число материалов, принятых для обсуждения на специализированных сессиях, будут в распоряжении делегатов Конференции только на одном из этих официальных языков.

3. Резюме всех документов в том виде, в каком они были представлены их составителями, будут в распоряжении делегатов Конференции на следующих официальных языках Организации Объединенных Наций: русском, английском, испанском и французском.

4. До открытия Конференции документы и резюме не будут выпущены для общего распространения. Они будут опубликованы заблаговременно только в ограниченном числе экземпляров и исключительно для правительственных делегаций и других правомочных участников. Последующие опубликование и рассылка трудов Конференции будут обеспечены в соответствии с практикой Организации Объединенных Наций, как это установлено ее Издательским комитетом.

МЕТОДЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ СУШКИ ХИМИЧЕСКИХ, ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ И СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.В. Лыков

Сушка влажных материалов является не только теплотехническим процессом, но в первую очередь технологическим процессом, при котором происходит изменение структурно-механических, физико-химических и биологических свойств материала. Поэтому основной задачей сушки является получение сухого материала с наилучшими технологическими свойствами. Однако, не надо забывать, что сушильные устройства должны разрабатываться на основе следующих показателей рентабельности: 1) технологические свойства (качество высушенного материала), 2) длительность сушки, 3) расход тепла и электроэнергии на 1 кг испаренной влаги, 4) съём влаги с 1 $м^2$ производственной площади и 1 $м^3$ здания, 5) металлоемкость установки, 6) количество человекочасов обслуживающего персонала на 1 тонну продукции, 8) стоимость сушки по сравнению со стоимостью высушенного продукта. При этом необходимо иметь в виду, что при удалении 1 кг влаги из материала в области влажного состояния показатели рентабельности будут отличаться от тех же показателей при удалении из материала 1 кг влаги при влагосодержании, близком к равновесному влагосодержанию.

В теории сушки [1] разработан метод определения показателей рентабельности с учетом изменения влагоотдачи с течением времени, т.е. с учетом кинетики сушки. Основным из восьми показателей, приведенных выше, является качество материала. Установлено, что качество материала зависит от механизма переноса влаги и тепла влажного материала. Если движение влаги происходит в виде жидкости, то одновременно вместе с жидкостью происходит перенос водорастворимых веществ (соли, танниды, витамины) и их вынос на поверхность сушимого материала. Если же движение влаги происходит в виде пара, то эти водорастворимые вещества остаются внутри материала. Перенос влаги происходит под действием двух термодинамических сил: градиента влагосодержания

∇u и градиента температуры ∇t . Если градиенты ∇u и ∇t направлены в одну сторону, то совместное их действие усиливает движение влаги. Если же ∇u и ∇t направлены в противоположные стороны, то действие одного из них препятствует действию второго. Это происходит потому, что под влиянием градиента влагосодержания влага перемещается от мест с большим влагосодержанием к местам с меньшим влагосодержанием (диффузия влаги). Под влиянием градиента температуры влага перемещается от мест с более высокой температурой к местам с меньшей температурой. Этот перенос влаги называется термодиффузией влаги в влажных материалах. Он открыт в Советском Союзе в 1934 году.

Если по технологическим соображениям необходимо сохранить водорастворимые вещества внутри сушимого тела (влажного материала), то перенос влаги должен быть в основном в виде пара. Это достигается путем интенсивного нагрева поверхности тела, например, при помощи инфракрасного излучения. Тогда градиент температуры будет направлен обратно градиенту влагосодержания (температура на поверхности тела больше,чем в центре тела, а влагосодержание на поверхности меньше, чем в центре). Градиент температуры будет препятствовать движению влаги в виде жидкости от центра тела к его поверхности и тем самым перенос водорастворимых веществ сведется к минимуму.

В процессе сушки, когда подвод тепла происходит конвекцией или радиацией, температура поверхности тела всегда больше температуры в центре его. Поэтому для ускорения процесса сушки стремятся уменьшить этот перепад температуры (измельчение материала, сочетание повышения с понижением температуры воздуха и т.д.).

Наоборот, если температура в центре тела больше,чем на поверхности, то градиент температуры способствует переносу влаги в виде жидкости. Поэтому для трудно сушимых материалов сочетают быстрый прогрев (период нагрева) с более длительным охлаждением (отлежка).При охлаждении нагретого тела воздухом жидкообразная влага под действием термодиффузии мигрирует на поверхность тела, где и происходит её испарение. Этот осциллирующий метод сушки (нагрев и отлежка) исключает перегрев материала, значительно уменьшает расходы тепла и электроэнергии. Такой метод сушки был применен в Энергетическом институте для сушки зерна. Нагрев зерна происходит в пневмотрубе во взвешенном состоянии при температуре 200°С в течение 3 секунд и охлаждение (отлежка) в бункере-шахте - в течение 35-40 минут. Во время отлежки влага мигрирует в виде жидкости вместе с водорастворимыми

веществами к поверхности зерна, подводя к зародышу зерна эти вещества (на поверхности зерна вблизи зародыша испаряется большая часть влаги). В результате всхожесть зерна (пшеницы) увеличивается на 15-20% при значительном увеличении энергии прорастания.

В условиях большинства районов СССР это означает, что на шесть тонн засеянного зерна получаем одну добавочную тонну зерна за счет увеличения всхожести зерна. Такие зерносушилки Энергетического института производительностью 50 тонн/час строятся на целинных землях (Казахская ССР), в Сибири и на Урале.

Примеров использования закономерностей тепло- и влагопереноса внутри влажных тел для улучшения качества материала можно привести много. Например, комбинированный метод сушки с периодическим прерывным облучением был применен А.А.Бильневичем [4] для сушки овощей (картофель, морковь, свекла и др.). В результате процесс сушки протекал несравненно интенсивнее, чем при сушке только нагретым воздухом, а качество материала получается очень хорошим (см.табл.1).

Теория сушки влажных материалов позволяет рассчитать поле температуры и влагосодержания сушимого тела на протяжении всего процесса сушки. Это дает возможность рассчитать длительность сушки, количество влаги, перемещающейся в теле в виде жидкости и в виде пара, а также найти оптимальные условия сушки. Современные автоматизированные сушильные устройства имеют автоматический контроль влагосодержания сушимого тела при помощи датчиков влагосодержания, основанных на поглощении гамма и бета-лучей от радиоактивных источников.

Знание поля влагосодержания сушимого тела необходимо для расчета режимов интенсивной сушки без нарушения их структуры. Причиной появления трещин (локальное разрушение), а также полного разрушения (потеря целостности структуры) является развитие объемно-напряженного состояния тела свыше предельно допустимого, обусловленного прочностью тела.

Это напряженное состояние создается недопущенной усадкой, которая, в свою очередь, возникает в результате неравномерного распределения влагосодержания в теле. Недопущенная усадка прямо пропорциональна перепаду влагосодержания Δu между центром тела u_m и его поверхностью u_s ($\Delta u = u_m - u_s$). Относительный перепад влагосодержания ($\Delta u / u_0$), где u_0 - начальное влагосодержание, является мерой или критерием трещинообразования. Например, для глины (месторождение г.Киев) максимально допустимый относительный перепад равен 1,22 при начальном влагосодержании $u_0 = 30\%$ и 1,80 при $u_0 = 25\%$. По мере

сушки максимально допустимый перепад влагосодержания $\Delta u/u_*$ увеличивается, т.к. с понижением влагосодержания прочность материала возрастает.

В теории сушки показано, что относительный перепад влагосодержания $\Delta u/u_*$ равен удвоенному гигрометрическому критерию Кирпичева Ki' ($Ki'=2\Delta u/u_*$). Критерий Ki' прямо пропорционален интенсивности сушки j (кг/м^{2}час) и характерному размеру тела l (м) и обратно пропорционален коэффициенту диффузии влаги a_m (м^2/час) ($Ki'=jl/a_m\gamma_*u_*$), где γ_* – плотность сухого тела. Следовательно, за критерий трещинообразования можно принять критерий Кирпичева Ki', который дает возможность определить максимальную интенсивность сушки j

В периоде постоянной скорости сушки коэффициент a_m для керамических изделий зависит только от температуры. Температура тела в этом периоде равна температуре мокрого термометра t_b, последняя определяется температурой воздуха t_a и его относительной влажностью φ [$a_m=f(t_a,\varphi)$]. При заданной скорости движения воздуха v_a ($v_a=const$) критерий Кирпичева Ki' будет зависеть от t_a и φ [$Ki'=f(t_a,\varphi)$]. В результате можно построить серию кривых $Ki'=f(t_a)$ для разных значений φ (см.фиг.1). Максимально допустимый критерий Ki'_{max} равен 0,1 в начале процесса сушки ($u_*=25\%$) и $Ki'_{max}=0,2$ в середине первого периода сушки ($u=22\%$). На графике фиг.1 эти значения нанесены пунктирными линиями. Прямая $Ki'_{max}=const$ делит всю диаграмму фиг.1 на две части: верхнюю – область недопустимых режимов и нижнюю – область допустимых режимов. Из этой области допустимых режимов сушки выбирается наиболее оптимальный, в соответствии с конструкцией сушильного аппарата. С уменьшением влагосодержания Ki'_{max} увеличивается и область допустимых режимов расширяется. Отсюда следует, что оптимальные режимы должны быть ступенчатыми, а интенсивность сушки по мере высыхания тела – повышаться.

В настоящее время, на основе законов диффузии и термодиффузии влаги внутри материала, можно регулировать механизм влагопереноса при помощи изменения режимов сушки путем сочетания нагрева и охлаждения материала. В результате технологические свойства сушимого материала не только могут быть сохранены, но и улучшены. В качестве примера можно привести автоклавный метод сушки огнеупорных строительных материалов на диатомово-вяжущей основе с применением сброса давления [3]. При этом методе сушки создается особая капиллярно-по-

ристая структура тела, в результате чего прочность высушенных изделий повышается в 6-7 раз по сравнению с прочностью изделий, высушенных обычными методами. Помимо этого, теплопроводность изделия значительно уменьшается. Следовательно, сушка является термическим процессом улучшения технологических свойств сушимых материалов.

Оптимальный режим сушки не является постоянным, а изменяется по ходу процесса, в соответствии с закономерностями переноса тепла и влаги в теле. Осуществляются переменные режимы разными способами: подается в отдельные зоны сушилки воздух заданных параметров, применяются комбинированные методы подвода тепла (сочетание нагрева конвекцией с нагревом инфракрасными лучами, токами высокой частоты, периодический нагрев тела и т.д.). Наиболее распространенный метод сушки - это сушка нагретым воздухом. Для увеличения интенсивности сушки необходимо повысить температуру воздуха t_a . Необходимо иметь ввиду, что в первом периоде температура тела равна температуре мокрого термометра и только к концу сушки температура тела становится равной t_a . Поэтому для термоустойчивых материалов эффективным методом является сушка топочными газами. Важное значение при этом имеет качество сжигаемого топлива, в частности, его зольность, содержание серы.

Увеличение интенсивности сушки происходит при повышении скорости движения воздуха. Однако, большие скорости движения воздуха в сушилке требуют большего расхода электроэнергии. Поэтому в последнее время широко применяется локальный обдув сушимого тела с помощью сопел. Струя нагретого газа вытекает из сопел (щелей) со скоростью от 3 м/сек до 70 м/сек и ударяется о поверхность тела (замена продольного обтекания на перпендикулярное увеличивает коэффициент теплообмена примерно в 2 раза).

Такой метод сушки легко осуществить на ленточной сушилке. При этом для интенсификации сушки применяется нагрев материала инфракрасными лучами. При этом интенсивность сушки увеличивается не только за счет радиационного нагрева, но и в результате повышения коэффициента теплообмена. Например, при сушке тонких материалов в сушилке с сопловым обдувом при облучении от нагретых поверхностей с температурой 150°С и при температуре воздуха $t_a = 90°C$, выходящего из сопла со скоростью 12 м/сек, коэффициент теплообмена будет около 100 ккал/м^{2}час°С, интенсивность сушки 9 кг/м^{2}час,, при длительности сушки 9,4 сек. Хорошо сохнут в таких условиях тонкие гибкие материалы (бумага, кинопленка, ткани и др.). Экономические показатели та-

кой сушилки для бумаги (обойная бумага) приведены в табл.2 в сравнении с другими способами сушки.

Поэтому выгодно туннельные сушилки заменить ленточными с сопловым дутьем. Например, туннельная сушилка для каолиновых брикетов дает съём влаги около 13-15 кг/час с 1 $м^2$ площади камеры (на вагонетке находится 12 рядов брикета). Ленточная сушилка с сопловым дутьем дает 30-40 кг/час с 1 $м^2$ площади сушилки, т.е. съём влаги увеличивается в 2-3 раза. Кроме того, загрузку и выгрузку на ленточной сушилке легко механизировать.

Сопловой обдув выгоден тем, что он позволяет интенсифицировать сушку термонеустойчивых и трудносушимых коллоидных тел. Он дает возможность осуществить принцип нагревания и охлаждения сушимого тела в соответствии с закономерностями тепло и влагопереноса путем обдува воздухом с разной температурой или при помощи лучистого нагрева на отдельных участках по пути движения материала.

На основе этого метода переделаны ленточные сушилки "Империал" для картофеля и капусты на Грязникском комбинате,что увеличило производительность сушилки с 3,5 тонн/час до 5-6 т/час [4].

П.Г.Романков [4] разработал по этому принципу сушильную установку для сушки химических материалов (углекислый никель). По существу эта установка является сочетанием вальцевой и ленточной сушилок (первый вариант) или вальцевой и барабанной сушилок (второй вариант). Она дает сокращение длительности сушки по первому варианту в 8 раз, а по второму - в 10 раз.

По такому же принципу построена сушилка для желатины. Вначале желатина, нарезанная в виде кубиков, сохнет на ленточной сушилке,а затем в сушилке с кипящим слоем. В результате устранено слипание частиц в начале процесса, длитель ность сушки сокращается в пять раз (вместо 18 час.сушка происходит 3,5 ч.), расход воздуха сокращается в 1,2 раза, а расход тепла в 1,5 раза. Здесь необходимо отметить, что наилучшие результаты в смысле равномерности сушки дает сушка в кипящем слое. Этим способом рекомендуется сушить мелкозернистые материалы. Однако, коэффициенты теплообмена при сушке в кипящем слое значител ьно меньше,чем при сушке в неподвижном слое при одинаковых температурах и скоростях движения газа. Поэтому целесообразно при сушке в кипящем слое применять радиационный метод нагрева материала. Такие установки разработаны в Энергетическом институте АН БССР.

Коллоидные химические материалы сохнут быстрей в паре с капил-

лярно-пористыми телами. Влага из коллоидного тела мигрирует в капиллярно-пористое тело в период отлежки. В периоде нагрева влага быстрей испаряется из пористого тела. Переход влаги из одного тела к другому при их соприкосновении называется контактный влагообмен. Потенциалом переноса влаги от одного тела к другому является не перепад влагосодержания между ними, а термодинамический потенциал влагопереноса, характеризующий энергию связи влаги с материалом. Для этого случая обезвоживания разработана специальная потенциальная теория влагообмена [3]. Для ряда химических материалов в качестве капиллярно-пористого тела, контактирующего с сушимым материалом, применяется мел. Комбинированные сушилки с использованием контактного влагообмена имеют распространение в химической промышленности.

Прогрессивным и конкурентоспособным методом сушки некоторых пищевых продуктов является сушка сублимацией в вакууме. Материал помещается в камеру, где при помощи вакуумнасосов созда ется разряжение около 1-3 мм рт.ст. В результате быстрого испарения жидкости материал охлаждается ниже нуля и большая часть влаги замерзает. Происходит испарение льда, водяные пары удаляются насосом и конденсируются в холодильнике (температура холодильника $t_к$ - 25°С). Тепло, необходимое для испарения, передается от воздуха ($t_в$=+20-25°С), который нагревается в камере калорифером, а также путем радиации от стенок калорифера.

Для сушки пищевых продуктов (мясо, рыба, фрукты), медицинских препаратов и различных органических веществ, в которых необходимо сохранить их природные свойства после сушки, этот метод не имеет себе равных (при сушке сублимацией сохраняется первоначальный объем материала, его цвет). После оводнения высушенного продукта, он вновь приобретает все свои свойства до сушки (запах, вкус и т.д.). В г.Ростове на Дону на фабрике "Смычка" имеется цех по сушке пищевых продуктов сублимацией. Производственные данные по сушке мяса и рыбы приведены в табл.3.

Основные пути интенсификации процесса сушки определяются технологическими свойствами сушимого материала и теплоэнергетическими процессами всего производства в целом. Режимы сушки и конструкция сушильных устройств выбираются на основе закономерностей тепло- и влагопереноса в коллоидных капиллярно-пористых телах.

Без знания и дальнейшего развития теории тепло- и массообмена и учения о видах связи влаги с материалом невозможен дальнейший

Прогресс техники сушки, неразрывно связанный с улучшением структурно-механических, физико-химических и биологических свойств высушенных материалов.

Во многих менее развитых странах, в силу особенностей субтропического влажного климата проблемы интенсификации процессов сушки имеют большое и важное значение. В этой связи опыт и достижения Советского Союза в этой области могут представить определенный интерес.

Табл.1

Влияние разных режимов облучения на содержание каротина в моркови при сушке инфракрасными лучами

Режим облучения	τ, час	N, %/час	Температура материала при: u = 500%	Температура материала при: u = 100%	ω (%)
1:0	0,77	31,3	70°С	130°С	48
5:10	0,79	34,8	38°С	68°С	82
3:10	1,10	31,2	37°С	58°С	96

τ - общая длительность облучения при удалении влаги от 1000% до 10%, N - скорость сушки в периоде постоянной скорости, ω - относительное содержание каротина в высушенном продукта (сохранность каротина).

Табл.2

Наименование	Тип сушки			
	1	2	3	4
Расход тепла в ккал/кг испаренной влаги	3.300	2.300	1.062	1.062
Расход воздуха в кг/кг	227	-	33,3	33,3
Расход электроэнергии в квт/ч/т испаренной влаги	72	100	40	55
Кубатура здания в $м^3$/м испаренной влаги	5.000	250	800	1.050
Длительность сушки в сек.	1.200	4,5	9,4	11,2

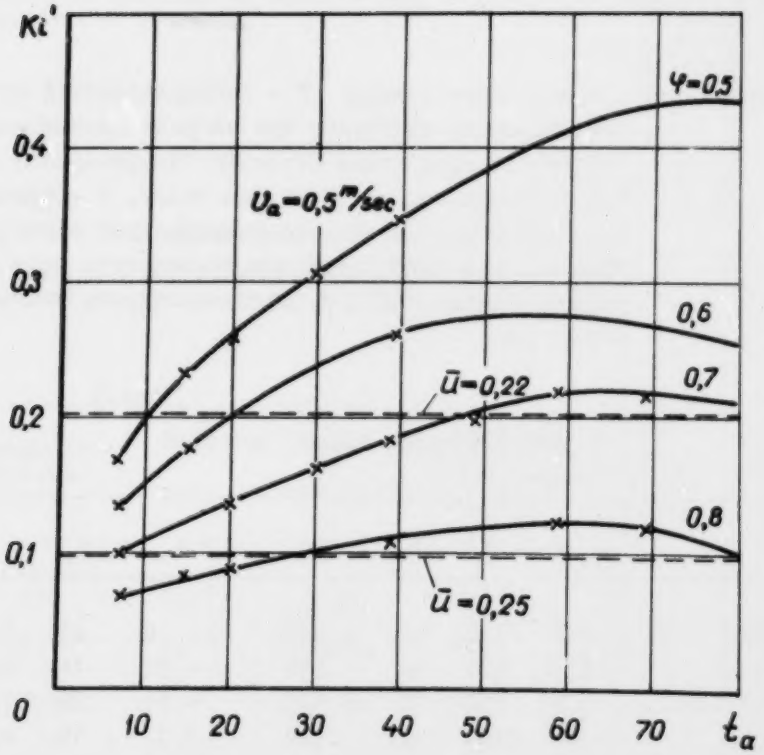
Примечание: 1 - петельная сушилка, 2 - комбинированная сушилка инфракрасного излучения при нагреве излучающих поверхностей продуктами огорания генераторного газа с использованием отработанных газов, 3 - сушилка с сопловым дутьем, 4 - комбинированная сушилка с инфракрасным подогревом при температура излучающей поверхности до 150°С и сопловым обдувом влажного материала.

Табл.3

Производственные данные по сушке сублимацией

Материал	$u_н$,%	τ	τ_{ic}	τ_s	t_m	t_a	p
Мясо-(фарш)	302	810	80	345	- 6	21	1,5
Мясо (фарш)	254	830	40	370	- 12	14	2,0
Рыба (кусковая)	373	860	70	415	- 11	20	1,5
Рыба (фарш)	340	1100	110	720	- 11	19	3,0
Рыба (фарш)	344	785	50	390	- 12	18	1,5

Примечание: τ - общая длительность сушки в мин,
τ_{ic} - длительность замораживания,
τ_s - длительность сублимации,
t_m - температура материала,
p - остаточное давление в мм рт.ст.



Подрисуночная подпись

Фиг.1. Зависимость гигротермического критерия Кирпичева Ki' от температуры t_a воздуха и его относительной влажности φ при сушке кирпичей из красной глины.

737 R - Nov.1962 - 600